

УДК 621.771.011

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ*

*Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных
металлов (umanskii@bk.ru)*

*Дорофеев В.В.², д.т.н., главный калибровщик рельсобалочного
цеха (vladimir.dorofeev@evraz.com)*

*Думова Л.В.¹, старший преподаватель кафедры «Менеджмент и отраслевая
экономика» (doumova@bk.ru)*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования методами горячих механических испытаний образцов на кручение и сжатие. Получены зависимости сопротивления пластической деформации рельсовых сталей, легированных хромом, от термомеханических параметров деформации (степень, скорость и температура деформации) и химического состава рассматриваемых сталей. По полученным данным повышение скорости и снижение температуры деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию, а влияние относительной деформации на сопротивление пластической деформации имеет нелинейный характер с выраженным максимумом при степени деформации порядка 0,25. С использованием методики множественного регрессионного анализа изучено влияние химического состава рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ и 90ХАФ на их сопротивление пластической деформации. Повышение содержания углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в фактическом интервале изменения их концентраций приводит к увеличению сопротивления рассматриваемых рельсовых сталей пластическому деформированию. Раскрыт механизм влияния перечисленных химических элементов на сопротивление рельсовых сталей пластической деформации. Аппроксимация полученных данных позволила определить интервал изменения сопротивления деформации при варьировании химического состава в рамках фактического интервала изменения содержания элементов. Величина указанного интервала составила до 19 % от абсолютного значения сопротивления деформации. При варьировании содержания химических элементов в интервале, оговоренном в ГОСТ на производство железнодорожных рельсов, величина интервала сопротивления деформации составила до 30 %. Проверка адекватности полученных зависимостей, проведенная путем осциллографирования работы двигателей приводов обжимных клеток рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при прокатке непрерывно литых заготовок различного химического состава, позволила подтвердить выявленные закономерности.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, рельсовые стали, энергосиловые параметры прокатки, химический состав, термомеханические параметры деформации, сопротивление пластической деформации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-318-326

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы имеет место четко выраженная тенденция по повышению требований к эксплуатационным характеристикам железнодорожных рельсов, что обусловлено увеличением грузонапряженности железнодорожных путей. По имеющимся данным за период с 2010 г. по 2018 г. грузонапряженность в целом по России возросла на 24 %, а по Восточному региону (Сибирь и Дальний Восток) зафиксирован рост данного показателя на 34 %.

В настоящее время гарантированный эксплуатационный ресурс железнодорожных рельсов произ-

водства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») составляет 750 млн т брутто на прямых участках пути, что в несколько раз превышает данный показатель десятилетней давности. Значительное увеличение эксплуатационной стойкости рельсов достигнуто за счет коренного изменения технологии производства рельсовой продукции на всех этапах производственного цикла, начиная от выплавки стали и заканчивая термообработкой рельсов [1]. В настоящее время основная масса железнодорожных рельсов как общего назначения, так и повышенной износостойкости и контактной выносливости, производится из рельсовых сталей, дополнительно легированных хромом. При этом для рельсов всех категорий применяется дифференцированная закалка с прокатного нагрева [2]. Следует также отме-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Материаловедение».

тить значительное повышение чистоты рельсовой стали по неметаллическим включениям и газам [3].

Основными направлениями дальнейшего увеличения эксплуатационной стойкости рельсов до 2,0 – 2,5 млрд т брутто являются разработка рельсовых сталей новых марок и совершенствование режимов термообработки. В частности, рассматриваются варианты производства рельсов из заэвтектонидных сталей и закалки с отдельного нагрева.

Необходимым условием конкурентоспособности рельсов с повышенными эксплуатационными характеристиками является энергоэффективность их производства, которая в значительной степени определяется наличием научно-обоснованных данных о деформационных характеристиках рельсовой стали новых марок. При производстве прокатной продукции, в том числе рельсов, одной из основных характеристик, определяющих величину нагрузок на оборудование (прокатные валки, механизмы клетки, электродвигатели), является сопротивление пластической деформации.

Величина сопротивления деформации зависит как от термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации), так и от физико-химических свойств прокатываемой стали (химический и фазовый состав, величина зерна). При этом большинство теоретических и экспериментальных исследований посвящено получению количественных зависимостей сопротивления сталей пластическому деформированию от термомеханических параметров деформации [4 – 22], а данные о влиянии химического состава сталей на сопротивление деформации носят оценочный характер либо имеют значительное ограничение по области применения. Так, например, в рабо-

те [19] утверждается, что сопротивление деформации среднемарганцовистых сталей (марок 15Г – 50Г) незначительно превышает данный показатель для сталей с аналогичным составом, но не легированных марганцем. Аналогичное суждение высказывается и о сталях, легированных хромом в концентрации 0,7 – 1,0 % (марки 15Х – 50Х). Влияние ванадия при его концентрации до 0,2 – 0,4 % на сопротивление деформации этими же авторами признается не значимым. В целом влияние легирующих элементов признается значимым только при их высокой концентрации или комплексном легировании несколькими элементами. Наибольшее же влияние на сопротивление деформации оказывает содержание углерода, который заметно снижает пластические и повышает прочностные свойства сталей. Рядом авторов разработаны формулы, учитывающие одновременное влияние термомеханических параметров деформации и химического состава стали на сопротивление пластической деформации (формулы Андреюка-Тюленева [20], А.В. Третьякова и В.И. Зюзина [19], Б.А. Мигачева [21]). Однако эти формулы не являются универсальными из-за наличия эмпирических коэффициентов (констант), полученных для сталей определенных марок.

Исходя из вышеописанного подхода влияние изменения содержания легирующих элементов в рамках интервала, оговоренного для стали конкретной марки, закономерно признается не значимым. Однако на практике использование данного допущения приводит к значительной погрешности расчетных данных. Так, по данным работ [23, 24] применение имеющихся методик расчета сопротивления деформации не позволяет получать стабильно низкую погрешность расчетных данных: погрешность может достигать 25 % и более.

Применительно к рельсовым сталям можно констатировать, что действующим стандартом (ГОСТ Р 51685 – 2013) допускается значительный интервал изменения содержания легирующих элементов, а также углерода в сталях, используемых для массового производства рельсов (марки 76ХФ, 76ХСФ, 90ХАФ) (табл. 1).

Таким образом, применительно к указанным рельсовым сталям исследование влияния химического состава на сопротивление деформации является актуальной задачей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования сопротивления деформации рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ и 90ХАФ проводили методами горячих механических испытаний, в том числе кручения и осадки. Использование различных экспериментальных методов определения сопротивления сталей пластическому деформированию позволяет повысить точность результатов. Сопротивление деформации в значительной степени зависит от схемы напря-

Т а б л и ц а 1

Химический состав рельсовых сталей по ГОСТ Р 51685 – 2013

Table 1. Chemical composition of rail steels according to the state standard GOST R 51685 – 2013

Элемент	Содержание элемента, %, в стали		
	76ХФ	76ХСФ	90ХАФ
C	0,71 – 0,82	0,71 – 0,82	0,83 – 0,95
Mn	0,75 – 1,25	0,75 – 1,25	0,75 – 1,25
Si	0,25 – 0,60	0,30 – 1,10	0,25 – 0,60
V	0,03 – 0,15	0,05 – 0,15	0,08 – 0,15
Cr	0,20 – 0,80	0,50 – 1,25	0,20 – 0,60
N	–	–	0,01 – 0,02
S	<0,02	<0,02	<0,02
P	<0,02	<0,02	<0,02
Cu	<0,20	<0,20	<0,20
Ni	<0,15	<0,15	<0,15

женного состояния при деформации, которая, в свою очередь, определяется видом испытания образца (растяжение, сжатие, кручение). Так, при испытаниях на сжатие (метод осадки) сопротивление деформации больше примерно на 10 % относительно результатов испытаний на растяжение. При использовании метода кручения значения сопротивления деформации будут находиться в диапазоне между значениями, полученными при испытаниях на растяжение и сжатие, так как образец деформируется только под действием касательных напряжений.

Для исследований сопротивления деформации методом горячего кручения использована специализированная лабораторная установка (рис. 1). Принцип работы установки заключается в следующем. Образец, имеющий цилиндрическую форму с головками с обеих сторон, помещается в предварительно нагретую до нужной температуры печь сопротивления (рис. 1, б), внутри которой фиксируется в пазах подвижного и неподвижного валов. Затем после выдержки в течение 10 мин, проводимой с целью полного и равномерного нагрева образца, подвижный вал приводится в движение с по-

мощью электродвигателя. Угол и скорость вращения являются регулируемыми. Сопротивление пластическому деформированию методом сжатия исследовали на установке «Gleeble System 3800» с использованием модуля «Hydrawedge» («Гидромолот») путем деформации цилиндрических образцов между двумя плоскими бойками (вариант деформации «Flow Stress»).

В качестве объекта экспериментальных исследований использовали образцы непрерывно литых заготовок рельсовых сталей вышеуказанных марок текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При выборе образцов руководствовались получением максимального интервала изменения содержания основных химических элементов (табл. 2).

Исследования проводили при температурах деформации 900 – 1150 °С с шагом 50 °С, скорости деформации 5 – 15 с⁻¹ с шагом 5 с⁻¹ и относительной деформации 0,05 – 0,40 с шагом 0,05. Указанные интервалы соответствуют термомеханическим параметрам прокатки в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

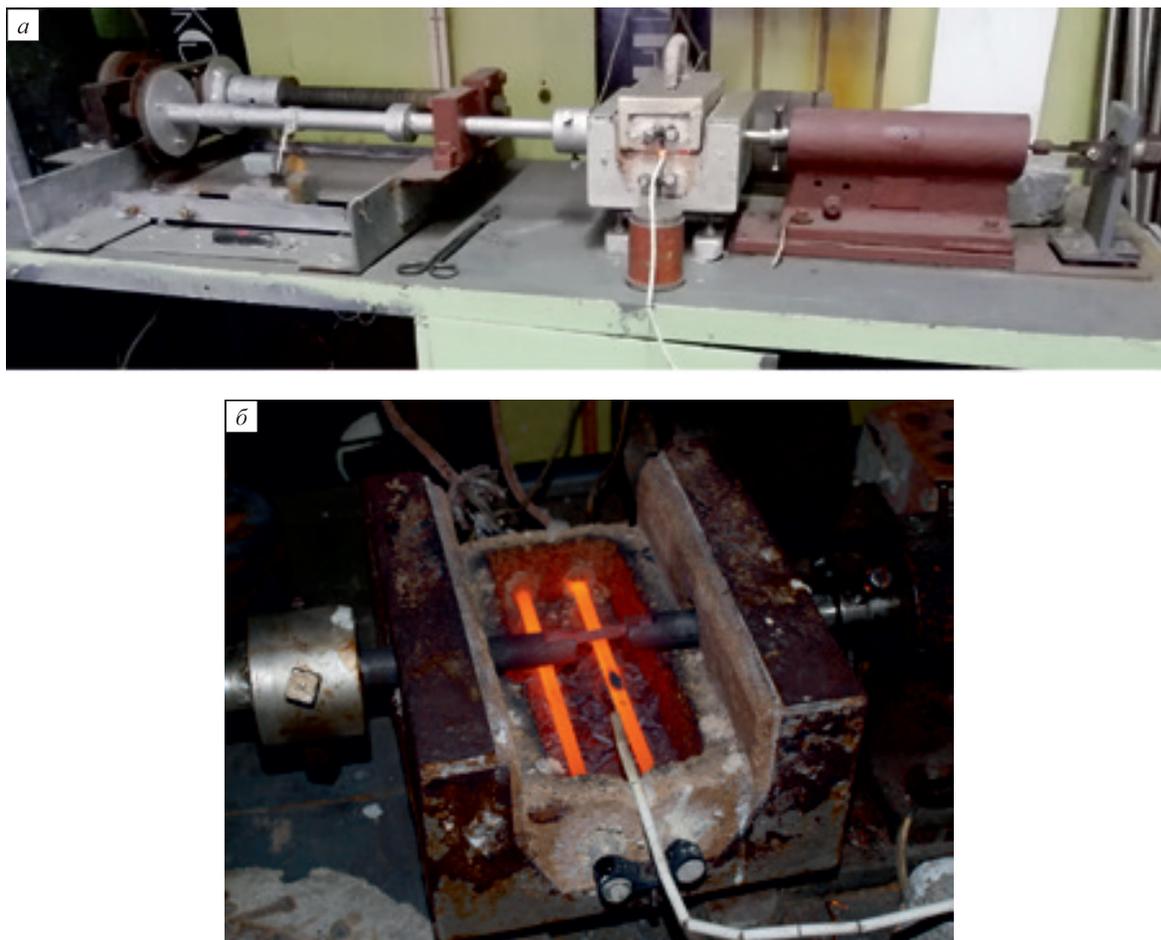


Рис. 1. Лабораторная установка для определения сопротивления пластической деформации методом горячего кручения: а – общий вид; б – размещение образца в печи сопротивления

Fig. 1. Laboratory unit for determining resistance to plastic deformation by hot torsion: а – general view; б – sample placing in resistance furnace

Таблица 2

Фактический химический состав исследуемых рельсовых сталей

Table 2. Actual chemical composition of the studied rail steels

Элемент	Содержание элемента, %, в стали		
	76ХФ	76ХСФ	90ХАФ
C	0,72 – 0,80	0,73 – 0,78	0,84 – 0,93
Mn	0,82 – 0,97	0,78 – 0,96	0,76 – 0,95
Si	0,39 – 0,56	0,33 – 0,64	0,42 – 0,53
V	0,03 – 0,07	0,04 – 0,08	0,08 – 0,11
Cr	0,36 – 0,54	0,52 – 0,69	0,24 – 0,39
N	0,006 – 0,012	0,007 – 0,011	0,010 – 0,015
S	0,009 – 0,018	0,007 – 0,017	0,007 – 0,016
P	0,008 – 0,015	0,005 – 0,016	0,006 – 0,014
Cu	0,07 – 0,14	0,06 – 0,11	0,06 – 0,12
Ni	0,05 – 0,11	0,04 – 0,09	0,03 – 0,12

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По полученным результатам увеличение относительной деформации до значений порядка 0,25 приводит к повышению сопротивления пластическому деформированию, а дальнейшее увеличение относительной деформации незначительно снижает данный показатель (рис. 2). При этом указанная зависимость наблюдается независимо от температуры и скорости деформации. Повышение скорости и снижение температуры деформации при одной и той же степени деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию. Полученные зависимости качественно согласуются с результатами ранее проведенных исследований применительно к рельсовым сталям [25, 26] и исследованиями других авторов для сталей схожего химического состава.

На основании математической обработки экспериментальных данных получены уравнения множественной регрессии, характеризующие влияние химического состава рассматриваемых рельсовых сталей на сопротивление деформации. Уравнения регрессии, полученные при сочетании термомеханических параметров, при которых формируется максимальное сопротивление деформации σ_s (относительная деформация 0,25, скорость деформации 15 с⁻¹, температура деформации 900 °С), приведены ниже:

– сталь 76ХФ:

$$\sigma_s = 82,4 + 77,8[C] + 63,5[Mn] + 131,7[V] + 1838,6[N] + 1071,4[S] + 1123,2[P];$$

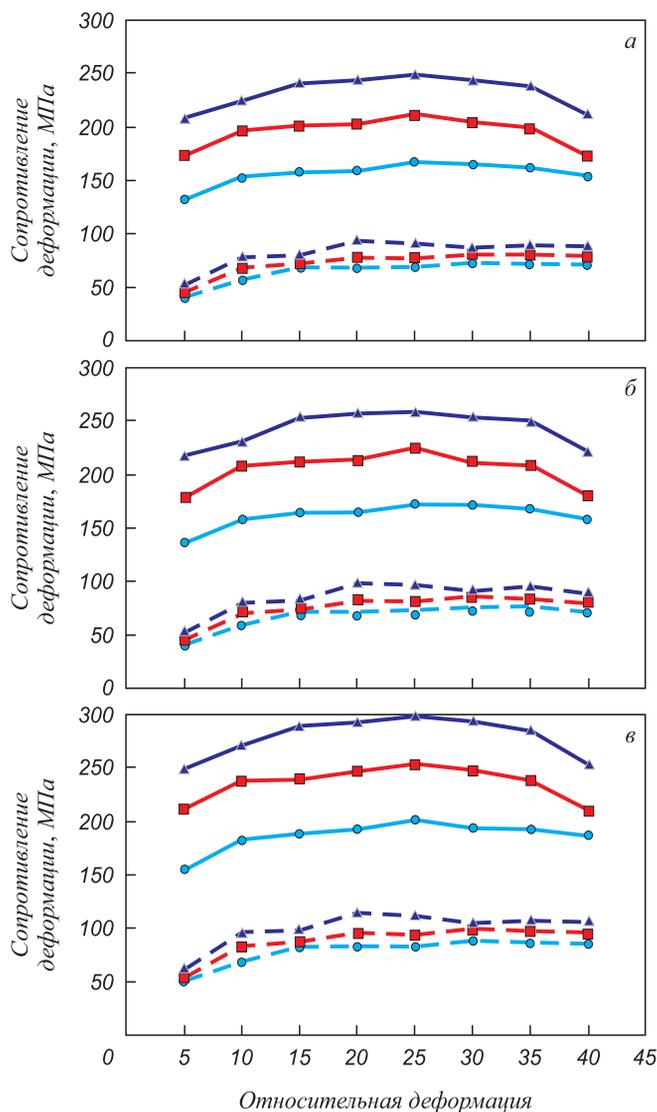


Рис. 2. Влияние термомеханических параметров деформации на сопротивление пластическому деформированию рельсовых сталей марок 76ХФ (а), Э76ХСФ (б), 90ХАФ (г): — 900 °С; - - - 1150 °С; Δ, □ и ○ – 15, 10 и 5 с⁻¹

Fig. 2. Effect of thermomechanical strain parameters on plastic deformation resistance of rail steels of 76KhF (a), E76KhSF (b), 90KhAF (g) grades:

— 900 °С; - - - 1150 °С; Δ, □ and ○ – 15, 10 and 5 s⁻¹

– сталь 76ХСФ:

$$\sigma_s = 85,7 + 81,2[C] + 70,4[Mn] + 129,9[V] + 2007,6[N] + 1201,9[S] + 1237,6[P];$$

– сталь 90ХАФ

$$\sigma_s = 88,3 + 79,4[C] + 83,2[Mn] + 151,1[V] + 2358,4[N] + 1032,2[S] + 1376,5[P],$$

где в квадратных скобках приведены содержания элементов.

Аналогичные уравнения получены для всех сочетаний термомеханических параметров в рамках рассматриваемого интервала их изменения.

По полученным данным повышение содержаний углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в рассматриваемом интервале изменения их концентраций приводит к увеличению сопротивления рельсовых сталей пластическому деформированию.

Характеризуя механизм влияния концентрации перечисленных химических элементов на сопротивление рельсовых сталей пластическому деформированию, можно отметить следующие основные моменты.

Полученные данные о влиянии содержания углерода в стали на сопротивление деформации согласуются с общепринятыми представлениями: повышение концентрации углерода в стали увеличивает ее прочностные характеристики, что связано с ростом относительного содержания цементита.

Фосфор присутствует в твердом растворе (феррите), повышает прочность и тем самым увеличивает сопротивление пластической деформации. Растворимость фосфора в железе значительно уменьшается при понижении температуры с 1,2 % при высоких температурах до 0,02 – 0,03 % при комнатной температуре, что обуславливает его склонность к сегрегации по границам зерен. Однако ввиду того, что концентрация фосфора в качественных сталях не превышает предела его растворимости, то практически весь фосфор растворен в железе.

Растворимость серы аналогично фосфору заметно уменьшается со снижением температуры, однако в отличие от фосфора имеет значительно меньшие абсолютные значения (0,05 % при температуре 1365 °С, 0,013 % при 1000 °С и 0,002 – 0,003 % при комнатной температуре). В результате практически вся сера выпадает по границам зерен в виде сульфидов железа или марганца при его высокой концентрации. С учетом

фактического содержания марганца в рассматриваемых сталях (табл. 2), а также основываясь на результатах ранее проведенных исследований [27], можно утверждать, что сульфиды железа практически отсутствуют, а сульфиды марганца (рис. 3, *a*) являются преобладающим типом неметаллических включений: имеют относительную концентрацию в готовых рельсах в пределах 30,8 – 43,4 ppm. Сульфиды марганца в отличие от сульфидов железа не оказывают резко отрицательного влияния на пластичность стали, так как их температура плавления (1620 °С) выше температуры горячей деформации. Однако ввиду более высокой по отношению к стали температуры плавления их пластичность при горячей деформации ниже, чем пластичность основного металла. В результате сопротивление деформированию в межкристаллитных прослойках возрастает, что сказывается на общем сопротивлении деформации.

Азот при наличии в стали достаточного количества нитридообразующих элементов (алюминия, ванадия, титана) практически полностью присутствует в виде соединений с ними (нитридов, карбонитридов). Указанные неметаллические включения являются непластичными, обладают высокой твердостью и характеризуются высокой температурой плавления. Таким образом, указанные включения повышают сопротивление стали пластическому деформированию. Рассматриваемые рельсовые стали легируются ванадием до достижения концентрации 0,03 – 0,11 %, содержание азота составляет до 0,015 % (по фактическим данным (табл. 2)), что предопределяет наличие нитридов и карбонитридов ванадия. По данным работы [28] в высокоуглеродистой литой стали образование карбонитридов ванадия возможно даже при отсутствии легирования азотом, достаточным является остаточное содержание азота в электростали. Кроме того, по результатам металлографических исследований установлено наличие в рельсах нитридов алюминия баллом от 16 до 36 по

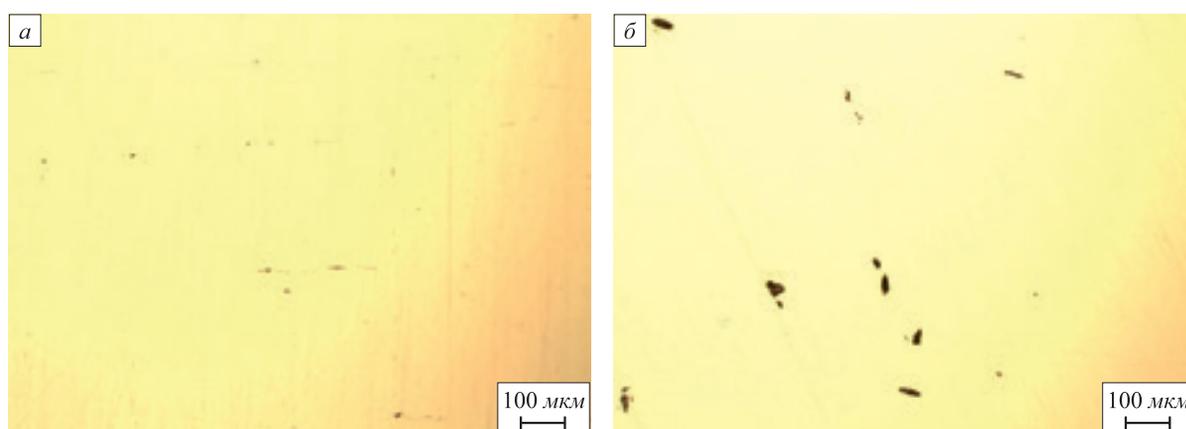


Рис. 3. Характерные неметаллические включения в рельсовых сталях:
a – сульфиды марганца (балл 3б); *б* – нитриды алюминия (балл 3б)

Fig. 3. Typical non-metallic inclusions in rail steels:
a – manganese sulfides (grade 3b); *b* – aluminum nitrides (grade 3b)

ГОСТ 1078 – 70 (рис. 3, б), несмотря на отказ от раскисления алюминием и концентрацию данного элемента в стали на уровне не более 0,004 %.

Следует отметить, что полученные зависимости, характеризующие влияние углерода, марганца, серы и фосфора на сопротивление деформации, согласуются с результатами ранее проведенных исследований для стали Э78ХСФ [29]. При этом влияние ванадия имеет противоположный характер (по данным указанных исследований увеличение концентрации ванадия снижает сопротивление деформации). Этот факт объясняется тем, что при проведении исследований сопротивления деформации стали Э78ХСФ не рассматривалось влияние на данный показатель содержания азота в стали. В таком случае, очевидно, в анализируемых образцах с более низким содержанием ванадия имела место повышенная концентрация азота (которая не учитывалась при проведении исследований), что и привело к искажению общей картины.

В связи с выявленным комплексным влиянием параметров деформации и химического состава рельсовых сталей на их сопротивление пластическому деформи-

рованию для практического применения полученных зависимостей целесообразным представляется подход, предложенный автором работы [30], согласно которому сопротивление деформации определяется не конкретным числом, а диапазоном значений при определенном сочетании термомеханических параметров деформации.

Для определения указанного интервала проведен вычислительный эксперимент с использованием полученных уравнений регрессии. Рассмотрены варианты наиболее «благоприятного» и «неблагоприятного» с точки зрения сопротивления пластическому деформированию химического состава. По полученным данным (рис. 4) при варьировании химического состава рельсовых сталей в рамках фактического интервала изменения содержания элементов интервал изменения сопротивления деформации составляет до 19 % от абсолютных значений данного параметра, а при варьировании химического состава в рамках интервала, оговоренного ГОСТ Р 51685 – 2013, – до 30 %.

С целью проверки адекватности полученных зависимостей в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведен промышленный эксперимент по прокатке рельсов из непрерывно литых заготовок стали Э76ХФ химического состава, соответствующего условно «благоприятному» (с минимальной концентрацией углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора) и «неблагоприятному» (с максимальным содержанием указанных элементов) составу. При прокатке проводили осциллографирование параметров работы двигателей приводов обжимных клетей. Полученные результаты свидетельствуют (рис. 5), что моменты на валу двига-

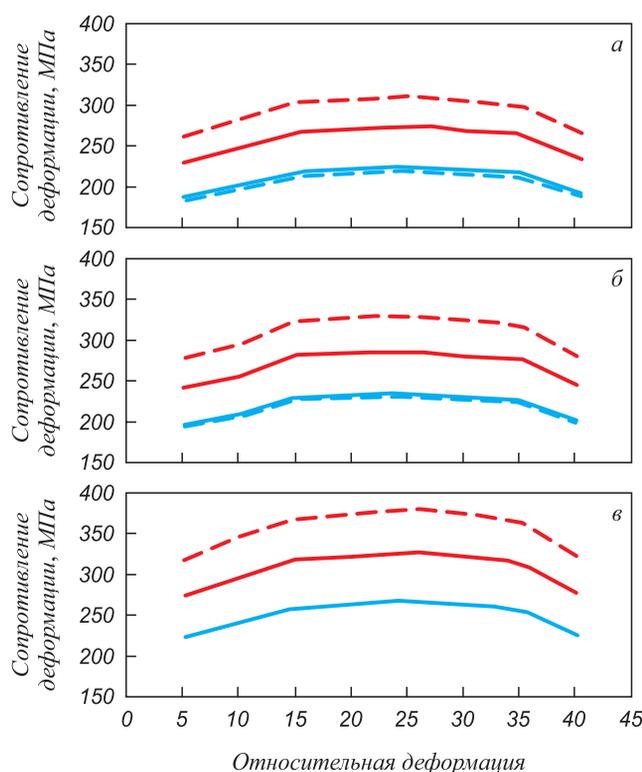


Рис. 4. Интервал сопротивления пластической деформации при варьировании химического состава рельсовых сталей марок 76ХФ (а), Э76ХСФ (б), 90ХАФ (в):

--- требования ГОСТ Р 51685 – 213;

— фактические значения

Fig. 4. Interval of resistance to plastic deformation when varying chemical composition of rail steels of 76KhF (a), E76KhSF (b), 90KhAF (c) grades:

--- requirements of the state standard GOST R 51685 – 213;

— actual values

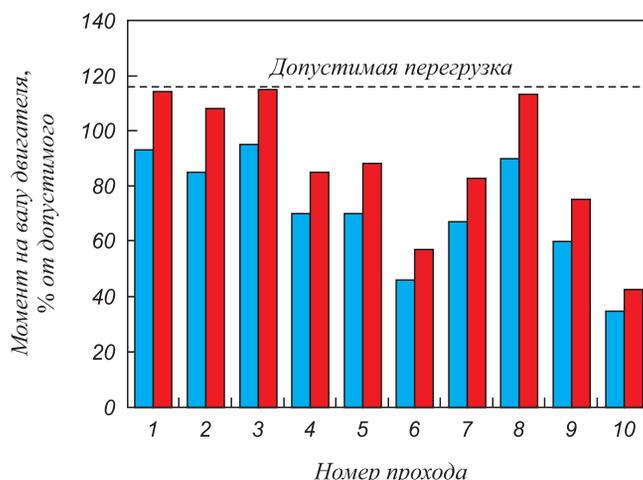


Рис. 5. Нагрузка на двигатели привода обжимных клетей рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при прокатке заготовок различного химического состава:

■ – благоприятный режим; ■ – неблагоприятный режим

Fig. 5. Load on drive motors of crimping stands of the rail and beam mill of JSC “EVRAZ ZSMK” when rolling billets of various chemical composition:

■ – favorable mode; ■ – unfavorable mode

телей при прокатке рельсов из заготовок «неблагоприятного» химического состава на 21 – 27 % превышают нагрузку на двигатели относительно прокатки заготовок условно «благоприятного» химического состава. При этом для «неблагоприятного» режима перегруз двигателя в ряде проходов близок к предельно допустимому (115 % от номинального значения). Таким образом, можно сделать вывод об адекватности полученных зависимостей и необходимости учета данного интервала при проектировании новых режимов прокатки.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований определены закономерности влияния термомеханических параметров деформации и химического состава рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ и 90ХАФ на сопротивление пластической деформации. Установлено, что повышение скорости и снижение температуры деформации при одной и той же относительной деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию. При этом влияние относительной деформации на сопротивление пластической деформации имеет нелинейный характер: до степени деформации порядка 0,25 наблюдается увеличение данного показателя, а при дальнейшем росте степени деформации сопротивление деформации незначительно снижается.

Определено, что повышение содержания углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в фактическом интервале изменения их концентраций для непрерывно литых заготовок рассматриваемых сталей текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» приводит к увеличению сопротивления рельсовых сталей пластическому деформированию.

На основании полученных данных, обобщенных в виде уравнений множественной регрессии, определен интервал изменения сопротивления деформации при варьировании химического состава в рамках фактического интервала изменения содержания элементов и в рамках интервала, оговоренного ГОСТ, который составил до 19 и до 30 % соответственно. Адекватность полученных зависимостей подтверждена результатами опытной прокатки в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Polevoi E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. New rail products at AO EVRAZ ZSMK // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. No. 7. P. 484 – 488.
2. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянец М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 10. С. 704 – 714
3. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoi E.V., Boikov D.V., Spirin, S.A. Influence of rare-earth modification on the formation of nonmetallic inclusions in high-carbon steel // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 11. P. 805 – 813.
4. Li W.-G., Feng N., Zhao Y.-T., Yan B.-K. Prediction of deformation resistance during hot rolling process based on generalized additive model // *Journal of Iron and Steel Research*. 2018. Vol. 30. No. 6. P. 447 – 452.
5. Liu C., Li W.-G., Wang B., Zhang L.-L. Prediction of deformation resistance for hot rolled strip based on ANFIS. – In: *Proceedings of the 12th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017*. 2018. P. 1701 – 1705.
6. Shkatov V.V., Mazur I.P., Chetverikova T.S., Knapinski M. Simulation of dynamic recrystallization and resistance to deformation of carbon and low-alloyed steels during hot forming // *Chernye Metally*. 2018. No. 11. P. 22 – 27.
7. Ghadar S., Momeni A., Tolaminejad B., Soltananezhad M. A comparative study on the hot deformation behavior of 410 stainless and K100 tool steels // *Materials Science and Engineering A*. 2019. Vol. 760. P. 394 – 406.
8. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFB and 18Kh3MFB to hot deformation // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59. No. 11-12. P. 1118 – 1121.
9. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08Kh18N10T steel at a hot-deformation temperature // *Russian metallurgy (Metally)*. 2008. Vol. 2008. No. 2. P. 138 – 141.
10. Safronov A.A., Belskiy S.M., Chernyj V.A., Mazur I.P. Modeling of temperature influence on resistance to plastic deformation of electrotechnical steels in hot rolling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1134. No. 1. Article 012050.
11. Rodriguez-Ibabe J.M., Gutiérrez I., López B., Iza-Mendia A. Modeling of the resistance to hot deformation and the effects of microalloying in high-al steels under industrial conditions // *Materials Science Forum*. 2005. Vol. 500-501. P. 195 – 202.
12. Kumar S., Aashranth B., Samantaray D., Davinci M., Borah U., Bhaduri A.K. Investigation on grain boundary character distribution during dynamic recrystallization of austenitic stainless steel during hot deformation // *Materials Performance and Characterization*. 2019. Vol. 8. No. 5. P. 796 – 807.
13. Hermant A., Suzon E., Petit P., Bellus J., Georges E., Cortial F., Sennour M., Gourgues-Lorenzon A.-F. Hot deformation and recrystallization mechanisms in a coarse-grained, niobium stabilized austenitic stainless steel (316Nb) // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2019. Vol. 50. No. 4. P. 1625 – 1642.
14. Kingkam W., Zhao C.-Z., Li H., Zhang H.-X., Li Z.-M. Hot deformation and corrosion resistance of high-strength low-alloy steel // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2019. Vol. 32. No. 4. P. 495 – 505.
15. Карпов С.В., Банщиков А.А., Карпова А.С. Сопротивление деформации марганцовистых сталей // *Ползуновский альманах*. 2008. № 3. С. 123 – 126.
16. Гладковский С.В., Потапов А.И., Лепихин С.В. Исследование сопротивления деформации мартенситно-старееющей стали ЭП679 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. No. 4. P. 18 – 28.
17. Потапов А.И., Батуева Е.А. Сопротивление деформации кремнемарганцовистых сталей для арматуры // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 10. С. 38 – 40.
18. Логинов Ю.Н., Батуева Е.А., Потапов А.И. Исследование сопротивления деформации кремнемарганцовистой стали. – В кн.: *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы II междунар. интерактив. науч.-практ. конф.* – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. С. 187 – 190.
19. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
20. Андреев В.Л., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава // *Сталь*. 1972. № 6. С. 522 – 523.

21. Мигачев Б.А. Сопротивление деформации в механике обработке давлением. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 176 с.
22. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов. – М.: Машиностроение, 2011. – 244 с.
23. Остапенко А.Л., Переходченко В.А., Кушнир О.Н., Пластиун Д.А. О применимости методик расчета сопротивления деформации для оценки энергосиловых условий горячей прокатки полос // *Сталь*. 2014. № 5. С. 41 – 51.
24. Остапенко А.Л., Руденко Е.А., Курдюкова Л.А. Оценка влияния методики определения сопротивления деформации на погрешность расчета силы горячей прокатки полос и листов // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2013. № 6. С. 38 – 44.
25. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Дорофеев В.В., Осколкова Т.Н. Исследования пластичности и сопротивления деформации легированных рельсовых сталей в температурном интервале прокатки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 6. С. 452 – 460.
26. Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадыков В.Н. Разработка теоретических основ определения энергосиловых параметров прокатки при освоении новых марок рельсовых сталей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 804 – 810.
27. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С. Исследования неметаллических включений в рельсах из электросталей, легированных хромом // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 12. С. 936 – 942.
28. Гарост А.И. Неметаллические включения и формирование структуры модифицированной высокомарганцевистой стали // *Литье и металлургия*. 2006. № 1. С. 75 – 83.
29. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. Article 012029.
30. Бровман М.Я. Определение сопротивления деформации при прокатке // *Сталь*. 2015. № 6. С. 40 – 44.

Поступила в редакцию 12 февраля 2020 г.

После доработки 4 марта 2020 г.

Принята к публикации 4 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 5, pp. 318–326.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR ENERGY-EFFICIENT PRODUCTION OF RAILWAY RAILS WITH IMPROVED PERFORMANCE PROPERTIES

A.A. Umanskii¹, V.V. Dorofeev², L.V. Dumova¹

REFERENCES

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Dependence of plastic deformation resistance of chromium-alloyed rail steels on the thermomechanical parameters of deformation (degree, speed, and temperature of deformation) and chemical composition of the steels under consideration was obtained by hot mechanical tests for torsion and compression. According to the obtained data, an increase in rate and a decrease in deformation temperature cause an increase in resistance to plastic deformation. Effect of relative deformation on resistance to plastic deformation is nonlinear with an expressed maximum at deformation degree of the order of 0.25. Analysis of influence of chemical composition of 76KhF, 76KhSF and 90KhAF rail steels and their resistance to plastic deformation was carried out using methods of multiple regression analysis. It has shown that increasing of content of carbon, manganese, vanadium, nitrogen, sulfur and phosphorus in the actual range of changes in their concentration leads to an increase in their plastic deformation resistance. Mechanism of this effect was revealed. Approximation of the obtained data allowed us to determine interval of changes in deformation resistance when chemical composition varies within the actual range of changes in elements content. Value of specified interval was up to 19 % of the absolute value of deformation resistance. When varying content of chemical elements in the interval specified in state standard for production of railway rails, value of deformation resistance interval was up to 30 %. Checking adequacy of the obtained dependences was performed by oscillographing the stands drives engines of rail mill of JSC “EVRAZ ZSMK” when rolling billets of different chemical composition. This checking made it possible to confirm the revealed patterns.

Keywords: railway rails, rail steels, energy-power parameters of rolling, chemical composition, thermomechanical parameters of deformation, resistance to plastic deformation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-318-326

1. Polevoi E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. New rail products at AO EVRAZ ZSMK. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 7, pp. 484–488.
2. Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. Development and commercial introduction of technology for differentiated heat treatment of railway rails with rolling heat utilization. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, pp. 704–714. (In Russ.).
3. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoi E.V., Boikov D.V., Spirin, S.A. Influence of rare-earth modification on the formation of nonmetallic inclusions in high-carbon steel. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 11, pp. 805–813.
4. Li W.-G., Feng N., Zhao Y.-T., Yan B.-K. Prediction of deformation resistance during hot rolling process based on generalized additive model. *Journal of Iron and Steel Research*. 2018, vol. 30, no. 6, pp. 447–452.
5. Liu C., Li W.-G., Wang B., Zhang L.-L. Prediction of deformation resistance for hot rolled strip based on ANFIS. In: *Proceedings of the 12th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2017*. 2018, pp. 1701–1705.
6. Shkatov V.V., Mazur I.P., Chetverikova T.S., Knapinski M. Simulation of dynamic recrystallization and resistance to deformation of carbon and low-alloyed steels during hot forming. *Chernye Metally*. 2018, no. 11, pp. 22–27. (In Russ.).
7. Ghadar S., Momeni A., Tolaminejad B., Soltanalinzhad M.A. Comparative study on the hot deformation behavior of 410 stainless and K100 tool steels. *Materials Science and Engineering A*. 2019, vol. 760, pp. 394–406.
8. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFB and 18Kh3MFB to hot deformation. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 1118–1121.
9. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08KH18N10T steel at a hot-deformation temperature. *Russian metallurgy (Metally)*. 2008, vol. 2008, no. 2, pp. 138–141.
10. Safronov A.A., Belskiy S.M., Chernyj V.A., Mazur I.P. Modeling of temperature influence on resistance to plastic deformation of electrotechnical steels in hot rolling. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018, vol. 1134, no. 1, article 012050.

11. Rodriguez-Ibabe J.M., Gutiérrez I., López B., Iza-Mendia A. Modeling of the resistance to hot deformation and the effects of microalloying in high-al steels under industrial conditions. *Materials Science Forum*. 2005, vol. 500-501, pp. 195–202.
 12. Kumar S., Aashranth B., Samantaray D., Davinci M., Borah U., Bhaduri A.K. Investigation on grain boundary character distribution during dynamic recrystallization of austenitic stainless steel during hot deformation. *Materials Performance and Characterization*. 2019, vol. 8, no. 5, pp. 796–807.
 13. Hermant A., Suzon E., Petit P., Bellus J., Georges E., Cortial F., Sennour M., Gourgues-Lorenzon A.-F. Hot deformation and recrystallization mechanisms in a coarse-grained, niobium stabilized austenitic stainless steel (316Nb). *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2019, vol. 50, no. 4, pp. 1625–1642.
 14. Kingkam W., Zhao C.-Z., Li H., Zhang H.-X., Li Z.-M. Hot deformation and corrosion resistance of high-strength low-alloy steel. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2019, vol. 32, no. 4, pp. 495–505.
 15. Karpov S.V., Banshchikov A.A., Karpova A.S. Deformation resistance of manganese steels. *Polzunovskii al'manakh*. 2008, no. 3, pp. 123–126. (In Russ.).
 16. Gladkovskii S.V., Potapov A.I., Lepikhin S.V. Studying the deformation resistance of EP679 maraging steel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015, no. 4, pp. 18–28. (In Russ.).
 17. Potapov A.I., Batueva E.A. Deformation resistance of silicon-manganese steels for reinforcement. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2013, no. 10, pp. 38–40. (In Russ.).
 18. Loginov Yu.N., Batueva E.A., Potapov A.I. Deformation resistance of silicon-manganese steel. In: *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii: Materialy II mezhdunar. interaktiv. nauch.-prakt. konf.* [Innovations in Materials Science and Metallurgy: Materials of the II Int. Interactive Sci.-Pract. Conf.]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2012, pp. 187–190. (In Russ.).
 19. Zyuzin V.I., Brovman M.Ya., Mel'nikov A.F. *Soprotivlenie deformatsii stalei pri goryachei prokatke* [Deformation resistance of steels during hot rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 270 p. (In Russ.).
 20. Andreyuk V.L., Tyulenev G.G., Pritsker B.S. Analytical dependence of deformation resistance of steels and alloys on their chemical composition. *Stal'*. 1972, no. 6, pp. 522–523. (In Russ.).
 21. Migachev B.A. *Soprotivlenie deformatsii v mekhanike obrabotke davleniem* [Deformation resistance at forming mechanics]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1997, 176 p. (In Russ.).
 22. Kalpin Yu.G., Perfilov V.I., Petrov P.A., Ryabov V.A., Filipov Yu.K. *Soprotivlenie deformatsii i plastichnost' metallov pri obrabotke davleniem* [Metals resistance to deformation and plasticity at forming]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 244 p. (In Russ.).
 23. Ostapenko A.L., Perehodchenko V.A., Kushnir O.N., Plastun D.A. On applicability of deformation resistance calculation methods for evaluating energy-force conditions of hot strip rolling. *Stal'*. 2014, no. 5, pp. 41–51. (In Russ.).
 24. Ostapenko A.L., Rudenko E.A., Kurdyukova L.A. Influence of methodology for deformation resistance determining on error of calculation of strength of strips and sheets hot rolling. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2013, no. 6, pp. 38–44. (In Russ.).
 25. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S., Dorofeev V.V., Oskolkova T.N. Plasticity and deformation resistance of the alloyed rail steels in rolling temperature interval. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 452–460. (In Russ.).
 26. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Development of theoretical basis of determining energy-power parameters of rolling at implementation of new grades of rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 804–810. (In Russ.).
 27. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S. Nonmetallic inclusions in rails made of electro-steel alloyed with chromium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 12, pp. 936–942. (In Russ.).
 28. Garost A.I. Non-metallic inclusions and structure formation of modified high-manganese steel. *Lit'e i metallurgiya*. 2006, no. 1, pp. 75–83. (In Russ.).
 29. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, article 012029.
 30. Brovman M.Ya. Determination of deformation resistance during rolling. *Stal'*. 2015, no. 6, pp. 40–44. (In Russ.).
- Funding.** The study was financially supported by the RFBR and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420011 using the equipment of the Center of Collective Use “Material Science”.
- Information about the authors:**
- A.A. Umanskii*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (umanski@bk.ru)
V.V. Dorofeev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator of Rail and Beam Shop (vladimir.dorofeev@evraz.com)
L.V. Dumova, Senior Lecturer of the Chair “Management and Branch Economy” (dumova@bk.ru)

Received February 12, 2020

Revised March 4, 2020

Accepted March 4, 2020